

Определение долговечности строительной керамики

Дмитрий Юрьевич Желдаков¹, Владимир Трофимович Ерофеев²

¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Масштабные натурные исследования разрушения кирпичной кладки, проведенные во многих регионах мира, показали, что подход к изучению долговечности строительной керамики на основании параметров прочности и морозостойкости не является показательным. Данные параметры не дают возможности получить временное значение долговечности материала, а служат лишь основанием для экспертной оценки.

Материалы и методы. Доказывается выдвинутая научная гипотеза о том, что разрушение материала кирпича в кирпичной кладке ограждающих конструкций происходит под действием процессов химической коррозии. Описывается процесс химической коррозии, кратко приводятся результаты термодинамических расчетов химических процессов. Дается краткое описание методик исследования долговечности материала строительной керамики, которые в настоящее время получили статус стандартов.

Результаты. Представлены результаты лабораторных исследований процесса химической деструкции материала строительной керамики, а также расчетов долговечности материала строительной керамики, выполненных на основании разработанного метода расчета долговечности материала.

Выводы. На базе разработанного теоретического обоснования и проведенных лабораторных исследований процесса химической деструкции материала стеновой керамики делается вывод о том, что созданная методика исследований и метод расчета позволяют определить долговечность материала на любых стадиях его эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная керамика, химическая коррозия, долговечность, кинетика процесса, методика исследований, морозостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Желдаков Д.Ю., Ерофеев В.Т. Определение долговечности строительной керамики // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 394–402. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Желдаков, djeld@mail.ru.

Determination of durability of building ceramics

Dmitriy Yu. Zheldakov¹, Vladimir T. Erofeev²

¹Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Large-scale field studies of the destruction of brickwork carried out by the author in many regions of the world showed that the approach to the research of the durability of building ceramics based on the strength parameter and the frost resistance parameter are not indicative. These parameters do not make it possible to obtain a temporary value of the durability of the material, but are just the basis for an expert assessment.

Materials and methods. This paper proves the scientific hypothesis put forward by the author that the destruction of brick material in the brickwork of enclosing structures occurs under the influence of chemical corrosion processes. The process of chemical corrosion is described, the results of thermodynamic calculations of chemical processes are briefly presented. A brief description of the methods of studying the durability of the building ceramics material, which have now received the status of standards, is given.

Results. The results of laboratory studies of the process of chemical destruction of the building ceramics material, as well as calculations of the durability of the building ceramics material performed on the basis of the developed method of calculating the durability of the material are presented.

Conclusions. Based on the developed theoretical justification and laboratory studies of the process of chemical destruction of the wall ceramics material, it is concluded that the created research methodology and calculation method allow to determine the durability of the material at any stage of its operation.

KEYWORDS: building ceramics, chemical corrosion, durability, kinetics of the process, research methodology, frost resistance

FOR CITATION: Zheldakov D.Yu., Erofeev V.T. Determination of durability of building ceramics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):394-402. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy Yu. Zheldakov, djeld@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В истории строительства можно выделить два основных периода, в течение которых для обоснования долговечности материала кирпича использовались определенные показатели.

Первым регламентирующим документом, который можно считать началом технического контроля за производством и качеством кирпича в России, является трактат-кодекс, составленный великими русскими архитекторами, работавшими в Комиссии о Санкт-Петербургском строении в 1720–1740 гг. [1, 2]. В данном документе кирпич предлагалось разделять на шесть видов, пять из которых (сырец исключался) по цвету: железный, полужелезный, красный, алый и белый. При этом подразумевалось, что цвет кирпича соответствует степени обжига.

Можно предположить, что цвет кирпича определяет его прочность, а прочность влияет на долговечность. Д.Ю. Желдаковым проведен ряд исследований на более чем 50 объектах исторических зданий [3]. По результатам исследований автором составлена таблица корреляции между цветом кирпича и его прочностью (табл.).

На рис. 1 можно увидеть разницу в степени деструкции, которая для более светлых кирпичей значительна по сравнению с черными кирпичами,


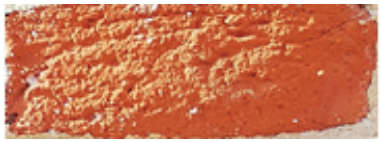



а степень разрушения темных красных кирпичей занимает промежуточное место. Корреляция между прочностью и долговечностью кирпича на отдельно взятом памятнике очевидна. Однако надо отметить, что на всех объектах сравниваются кирпичи, произведенные из одинаковой глины по одинаковой технологии. Сравнивая скорость разрушения кирпичей из разных регионов, т.е. с разным составом глины, разным процессом сушки и обжига, мы не можем получить какой-либо зависимости между цветом кирпича и его прочностью. И еще более важно, что, используя эти параметры, рассчитать долговечность материала кирпича невозможно.

Следующим этапом в анализе долговечности материала кирпича стало исследование морозостойкости. В 1884 г. на международном конгрессе по установлению однообразных способов испытания строительных материалов в Париже представитель от России в совете международного общества испытания материалов профессор Н.А. Белелюбский сделал доклад [4], где впервые представил метод испытания керамических камней на морозостойкость.

Методика проведения исследований, предложенная на конгрессе 1884 г., проста и мало изменилась в наши дни. Автор испытаний на морозостойкость критически подходил к разработанному

Соответствие между цветом кирпича и его прочностью

The correspondence between the colour of the brick and its strength.

| Марка Grade | Номер разбора (по Правилам 1847 г.) Partition number (according to the Rules of 1847) | Внешний вид Appearance | Прочность на сжатие, кгс/см ² Compressive strength, kgf/cm ² |
|--|--|--|---|
| Красный Red | 1 |  | 250–350 |
| Оранжевый (добавлен автором) Orange (added by the author) | –s |  | 170–250 |
| Полужелезняк Semi-iron | 2 |  | 350–400 |
| Железняк Iron-stone | 3 |  | 400–500 (625) |
| Алый Scarlet | 4 |  | 100–110 (87) |

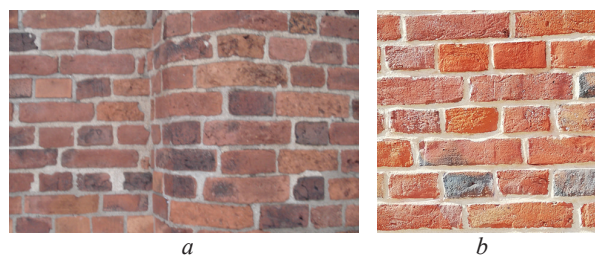


Рис. 1. Разрушение кирпичей разного цвета (прочности): *a* — кладка XVI в., г. Стокгольм; *b* — кладка XVII в., г. Минск

Fig. 1. Destruction of bricks of different colours (strength): *a* — masonry of the XVI century, Stockholm; *b* — masonry of the XVII century, Minsk

им методу. В докладе 1884 г. говорится: «Замораживание камней не дает никакого указания на абсолютное сопротивление действию мороза. Значение вышеприведенного исследования только относительное, так как оно позволяет только узнать, какие из камней скорее всего могут пострадать от действия мороза». Тем не менее испытания материалов на морозостойкость прочно вошли в современную практику. Сменив показатель прочности, показатель по морозостойкости используется в наши дни для оценки долговечности.

Однако уже в середине прошлого века испытания на долговечность по показателю морозостойкости начали ставить под сомнение [5, 6]. Многочисленные натурные и лабораторные исследования, выполненные автором, подтверждают тезис о том, что испытания на морозостойкость не дают надежного определения долговечности материала кирпича. На рис. 2 показаны два из исследованных объектов.

Анализ разрушения кладки, показанный на рис. 2, позволяет сделать следующие важные выводы: 1) схе-

ма разрушения кирпича не может быть описана внешним воздействием, так как при условии равного воздействия атмосферных условий на рядом уложенные кирпичи: температуры и влажности, кирпичи разрушаются неравномерно; 2) процесс разрушения протекает и без влияния отрицательных температур, так как в г. Сиена температура не снижается ниже нуля градусов (рис. 2, *a*).

Обследования имеют значительно более широкую географию, при этом все исследования подтверждают следующие выводы:

- механизм деструкции материала кирпича в кирпичной кладке одинаков и не зависит от времени производства кладки и от климата, в котором расположено здание с кирпичными ограждающими конструкциями. Кирпичная кладка зданий, возведенных в XII–XV вв. и в середине XX в., в зданиях, расположенных и в мягком средиземноморском, и в резко континентальном климате, разрушается в соответствии с едиными принципами;

- количество циклов заморзания–оттаивания не является определяющим параметром долговечности материала кирпича. При одинаковых климатических условиях (увлажнение, цикличность температуры, в том числе количество переходов через ноль) скорость деструкции кирпичей, даже находящихся рядом в кирпичной кладке, может значительно различаться.

Так как натурными исследованиями доказано, что процесс деструкции кирпича может протекать только при положительных температурах (рис. 2, *a*), использование параметра морозостойкости для оценки долговечности приводит к серьезным ошибкам, хотя и предлагается многими исследователями [7–10]. Расчет долговечности материала кирпича с использованием в качестве основного параметра

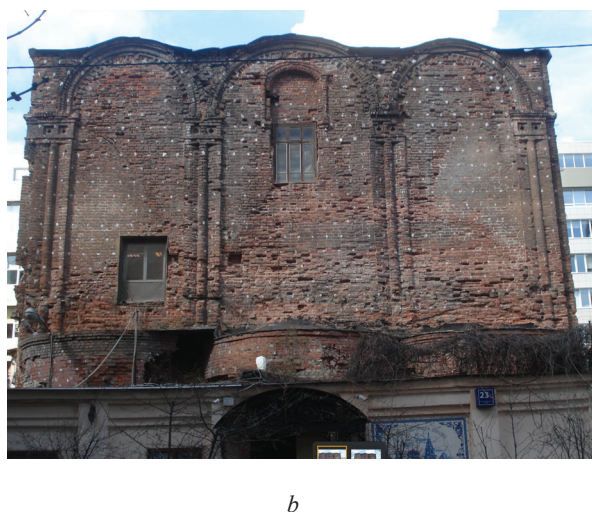


Рис. 2. Разрушение кирпичной кладки исторических зданий из полнотелого красного кирпича: *a* — крепость св. Варвары (вторая половина XVI в.), г. Сиена, Италия; *b* — храм Рождества Пресвятой Богородицы в Бутырской слободе (1682–1684 гг.), г. Москва, Россия

Fig. 2. Destruction of brickwork of historical buildings made of solid red brick: *a* — the Fortress of St. Barbara (second half of XVI century), Siena, Italy; *b* — the Church of the Nativity of the Holy Virgin Theotokos in Butyrskaya Sloboda (1682–1684), Moscow, Russia

марки кирпича по морозостойкости [11] невозможен, поскольку данный параметр дает лишь относительную оценку по критерию «да/нет» разрушению материала после определенного количества циклов замораживания–оттаивания.

Автором выдвинута гипотеза, что процесс деструкции материала стеновой керамики можно описать на основании законов физической химии, приняв за основу химическую природу процессов химической коррозии материала строительной керамики. Такой подход не только позволит более точно и корректно описать процесс деструкции, но и определить долговечность материала кирпича во временных единицах, что и стало целью настоящего исследования. При этом политермическое воздействие на кирпич приводит к ускорению разрушения материала, ослабленному процессами химической коррозии [12, 13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Химическая деструкция кирпича и кирпичной кладки описывается многостадийным процессом. На первой нехимической стадии происходит увлажнение материала стеновой керамики. На первой химической стадии процесса в материале кирпича происходит образование щелочей из оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. Щелочь может также поступать в кирпич из цементно-песчаного раствора. В основном это гидроксид кальция, образующийся в цементно-песчаном растворе при протекании процесса выщелачивания [14–17]. На второй химической стадии наблюдается взаимодействие образовавшихся в материале кирпича или/и поступивших в него из цементно-песчаного раствора щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы. При этом происходит полное разрушение материала кирпича до размеров частиц порядка 10^{-5} – 10^{-6} м, так как аморфная составляющая служит связующей фазой материала.

Для теоретического обоснования данного предположения, а также уточнения химических реакций, преимущественно протекающих при химической деструкции материала стеновой керамики, были выполнены термодинамические расчеты. В расчетах учтены 265 химических реакций, предположительно участвующих в процессе. Расчеты проводились с использованием стандартных термодинамических характеристик веществ с вычислением значения изобарно-изотермического потенциала реакции от температуры [18].

На основании выполненных расчетов определены направление протекания реакций и оценка их энергетической возможности; вероятность протекания реакций в одной системе при условии идентичности исходных структурных и кинетических факторов, а также выявлена устойчивость образующихся соединений. Термодинамические расчеты теоретически подтвердили правильность принятой

схемы процесса деструкции стеновой керамики, позволили уточнить процессы деструкции с установлением конечных продуктов реакций, а также сформулировать основные направления исследований кинетики процесса. Эти направления определяются исходя из ключевых факторов, влияющих на скорость химических реакций: концентрации веществ, вступающих в реакцию, и температуры протекания процесса.

Для исследования кинетики процесса были разработаны две методики, в настоящее время утвержденные как стандарты РФ^{1,2}. Стандартами вводится новый показатель работы строительной керамики: коэффициент химической деструкции C_d . Вводимый показатель имеет размерность, %/ч или ч⁻¹, что делает возможным его использование в расчете долговечности материала. Методика определения коррозионной активности влаги позволяет получить численные значения скорости образования щелочей при взаимодействии оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, присутствующих в материале кирпича, при его увлажнении. Получив кинетические характеристики процесса химической деструкции, можно составить феноменологическое уравнение долговечности материала стеновой керамики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Автором проведено значительное количество исследований кинетики процесса химической деструкции материала кирпича [19–21]. Так, например, важным результатом исследования было доказательство того, что концентрация гидроксидов щелочных металлов, в том числе через реакции образования хорошо растворимых силикатов калия и натрия, стабилизируется на уровне равновесной концентрации в данной системе.

Для доказательства этого утверждения проанализирован водородный показатель pH раствора в процессе эксперимента по определению коррозионной активности влаги. Важно отметить, что во всех случаях раствор имеет щелочные значения pH. В течение первых пяти часов для температур реакции 22 и 60 °С, а для температуры процесса 100 °С — в течение первых двух часов водородный показатель раствора увеличивается, после чего его значение практически стабилизируется. Это определяет равновесное состояние системы при данной температуре.

Анализ позволяет сделать вывод, что равновесная концентрация щелочей в растворе может быть установлена по состоянию системы после пяти ча-

¹ГОСТ Р 70565–2022. Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения коррозионной активности влаги.

²ГОСТ Р 70564–2022. Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения химической стойкости.

сов контакта материала кирпича с водой. Равновесные концентрации в растворе достигаются только гидроксидами щелочных металлов.

На основании результатов проведенных исследований определен температурный коэффициент скорости γ . Температурный коэффициент скорости входит как основание в выражение Вант-Гоффа, описывающее изменение скорости реакции от температуры в виде степенной функции:

$$v_t = \gamma^n \cdot v_0, \quad (1)$$

где $n = \frac{T - T_0}{10}$.

Учитывая результаты экспериментов и сделанных на их основании расчетов, уравнения Вант-Гоффа для равновесных концентраций при протекании реакций гидратации щелочных металлов запишутся следующим образом:

$$C_{\text{NaOH}} = C_{\text{NaOH}}^{22} \cdot 1,23^{\frac{t-22}{10}}; \quad (2)$$

$$C_{\text{KOH}} = C_{\text{KOH}}^{22} \cdot 1,28^{(t-22)/10}; \quad (3)$$

$$C_{\Sigma\text{max}} = C_{\Sigma\text{max}}^{22} \cdot 1,26^{(t-22)/10}. \quad (4)$$

Эти концентрации характерны только для исследуемого образца кирпича и учитываются в расчетах процесса химической деструкции материала.

Исследования процесса взаимодействия щелочи с материалом кирпича проводились при температуре процесса 22, 60 и 100 °С и разной дисперсности пробы кирпича с размерами зерен: 0,18–0,2 мм, 0,45–0,5 мм и 0,9–1,0 мм (рис. 3). Концентрация гидроксида калия в лабораторных исследованиях была равна 0,05, 0,5 и 5,0 н.

На рис. 3 показаны результаты исследования химической деструкции при температуре

100 °С и размере частиц 0,5 мм. Графическое определение коэффициента химической деструкции проводится по значению линейного коэффициента уравнения регрессии и устанавливает скорость деструкции материала кирпича.

На основании данных исследований можно выявить зависимость суммарной скорости процесса химической деструкции, выраженной через коэффициент химической деструкции, от концентрации щелочи. Эта зависимость запишется в виде:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{C_{d_1}}{C_{d_2}} = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{0,374}. \quad (5)$$

Выражение Вант-Гоффа для реакции деструкции материала кирпича запишется следующим образом:

$$v_t = v_{t_0} \cdot 2,89^n, \quad (6)$$

где $n = (t - t_0) / 10$.

Основываясь на результатах исследований и расчете физико-химических показателей протекания процесса химической деструкции материала стеновой керамики, в общем виде значение коэффициента химической деструкции для материала можно записать как функцию температуры и концентрации щелочей:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{\frac{t_0-t}{10}}} \left(\frac{C_{\Sigma\text{max}}}{C_0} \right)^k, \quad (7)$$

где Cd — коэффициент химической деструкции материала; Cd_0 — коэффициент химической деструкции материала, полученный в результате лабораторных исследований при концентрации щелочи $C_0 = 0,5$ н и температуре $t_0 = 100$ °С; γ_2 — температурный коэффициент скорости процесса химической деструкции

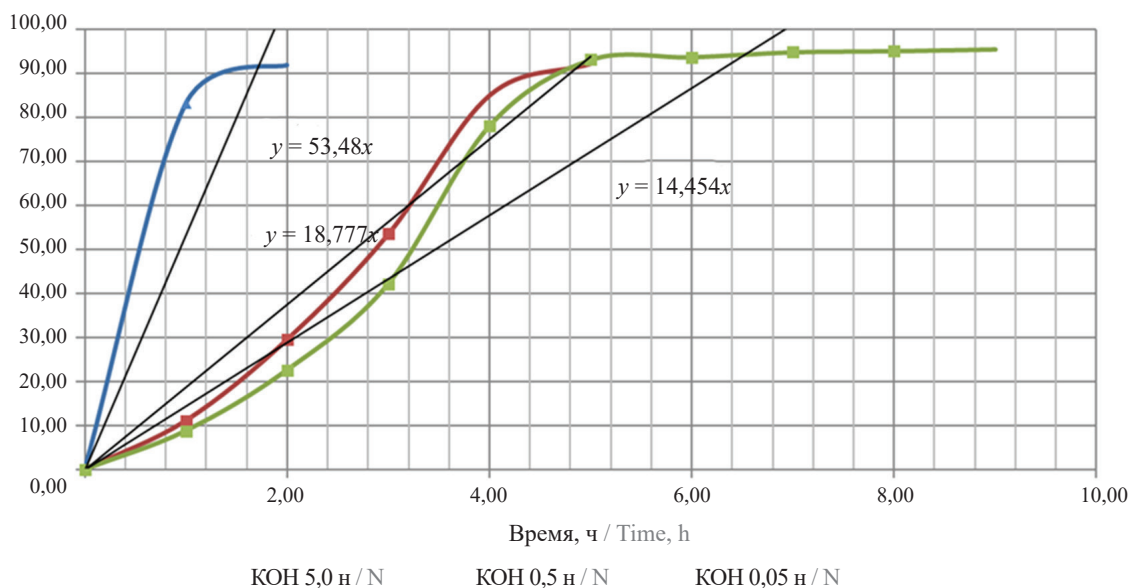


Рис. 3. Результаты исследования химической деструкции при 100 °С и размере частиц 0,5 мм
 Fig. 3. Results of the study of chemical destruction at 100 °С and a particle size of 0.5 mm

в формуле Вант-Гоффа, определенный в результате лабораторных исследований по разработанной методике; t — температура эксплуатации материала; $C_{\Sigma_{\max}}$ — максимальная равновесная концентрация гидроксидов в растворе.

Максимальная равновесная концентрация гидроксидов в растворе для положительных температур зависит от температуры в соответствии с уравнением Вант-Гоффа и определяется по формуле:

$$C_{\Sigma_{\max}} = C_{\Sigma_{\max}}^{22} \cdot \gamma_1^{\frac{t-t_{22}}{10}}, \quad (8)$$

где $C_{\Sigma_{\max}}^{22}$ — максимальная равновесная концентрация, определенная по разработанной методике, при температуре $t = 22$ °С; γ_1 — температурный коэффициент скорости процесса гидратации в формуле Вант-Гоффа, определенный в результате лабораторных исследований по разработанной методике; t_{22} — температура лабораторного эксперимента $t = 22$ °С.

Таким образом, учитывая выражения (7) и (8), коэффициент химической деструкции материала для положительных температур находится по формуле:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{10} \gamma_1^{10}} \left(\frac{\gamma_1^{10} C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k = \frac{Cd_0}{\gamma_2^{10} \gamma_1^{10}} \left(\frac{\gamma_1^{10} C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k \times \gamma_2^{\frac{t}{10}} \gamma_1^{\frac{t}{10}} = \frac{Cd_0}{\gamma_1^{10} \gamma_2^{10}} \left(\frac{C_{\Sigma_{\max}}^{22}}{C_0} \right)^k \cdot (\gamma_2 \gamma_1)^{\frac{t}{10}}. \quad (9)$$

Долговечность материала будет равна:

$$D = \frac{1}{Cd}. \quad (10)$$

Вычисленная в соответствии с приведенной методикой долговечность учитывает индивидуальные физические и химические характеристики материала.

Предложенный подход к исследованию химической коррозии строительной керамики основан на том, что процессы образования щелочей на первой стадии и процессы взаимодействия щелочей с оксидами кремния и алюминия рассматриваются не отдельно по каждой химической реакции, а по их совместному протеканию для определенного конкретного материала.

При этом основной механизм коррозии подтвержден термодинамическими расчетами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены натурные исследования работы материала кирпича в ограждающих конструкциях зданий, возведенных в разные эпохи и в разных климатических зонах. Показано, что прочность и морозостойкость кирпича не могут рассматриваться как определяющий параметр при оценке долговечности работы материала в ограждающих конструкциях.

Сформулирована научная гипотеза о возможности описания деструкции материала кирпича на основании процессов химической коррозии. Поставлена цель определить долговечность материала кирпича при его работе в ограждающих конструкциях во временных единицах. Разработан процесс химической деструкции материала кирпича, включающий три стадии: первую нехимическую стадию увлажнения материала, первую химическую стадию — образование щелочей в материале кирпича и вторую химическую — взаимодействие щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы материала.

Разработаны методики исследования кинетики протекания химических стадий процесса. Введены показатели процесса деструкции и методики их расчета. Проведены исследования кинетики процесса, которые позволили определить константы скорости реакций образования щелочей в материале и реакций взаимодействия щелочи с аморфной частью материала, коэффициенты в уравнениях Вант-Гоффа и Аррениуса, энергию активации процессов.

Разработана теория долговечности материала кирпича и на ее основе методика расчета долговечности материала во временных единицах. Теория долговечности предполагает, что основными силами, приводящими к деструкции материала, являются химические процессы. Данная теория означает, что применявшиеся ранее косвенные определения долговечности материала по прочности и морозостойкости не учитывают наиболее важный параметр — химический состав материала, что приводит к значительным ошибкам в оценке долговечности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Архитектурный архив. I / под ред. Д. Аркина (отв. ред.), Н. Брунова, И. Маца, Д. Сухова, О. Щусева. М. : Изд-во Акад. архитектуры СССР, 1946. С. 52.
2. Смирнов В.Н., Ёлишин Д.Д. Кирпичные клейма Санкт-Петербургской губернии середины XIX – начала XX в. Каталог и исследование // Бюллетень Института истории материальной культуры РАН. 2017. 214 с. EDN YRLOPX.

3. Желдаков Д.Ю., Пономарев О.И., Минасян А.А., Турсуков С.А. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий // Вестник НИЦ Строительство. 2023. № 1 (36). С. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDNZFIKOG.

4. Белелюбский Н.А. Однообразное испытание строительных материалов: Мюнхен, 1884. Дрезден,

1887. СПб. : Типография Министерства путей сообщения, 1888.

5. Подвальный А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 4–6. EDN IBENTJ.

6. Шестоперов С.В. Долговечность бетона. М. : Автотрансиздат, 1955. 480 с.

7. Белозеров Г.А., Бабакин Б.С., Макаров Б.А. Математическое моделирование продолжительности процесса замораживания и плавления эвтектического раствора в аккумуляторах холода // Известия КГТУ. 2011. № 23. С. 141–147. EDN OKLUJZ.

8. Аняньев А.И., Лобов О.И., Можжаев В.П., Вязовеченко П.А. Влияние различных факторов на долговечность конструкций, утепленных пенополистиролом // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 5–9. EDN JXNUBD.

9. Аняньев А.И. Долговечность и теплозащитные свойства наружных кирпичных стен старинных зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2018. № 2. С. 52–57. EDN YRGZXB.

10. Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Ланкин А.В., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Причины разрушения лицевого кирпича // Строительство и реконструкция. 2023. № 1 (105). С. 114–122. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-114-122. EDN RRGJANF.

11. Александровский С.В. Напряжения в пористом теле, возникающие при замерзании жидкой влаги в его порах // Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики : сб. докл. 2003. С. 9–17.

12. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М. : Стройиздат, 1973. 432 с.

13. Артамонова А.В. Вяжущие вещества на основе шлаков электросталеплавильного производ-

ства // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 11–13. EDN OBHCFZ.

14. Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гусев Б.В. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с. EDN UYVZTF.

15. Castellote M., Andrade C. Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (UR-CORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in situ // Revista ingeniería de construcción. 2009. Vol. 24. Issue 3. DOI: 10.4067/s0718-50732009000300003

16. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II // Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. Issue 3. Pp. 275–289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006

17. Jennings H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 1. Pp. 101–116. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00209-4

18. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М. : Стройиздат, 1972. 351 с.

19. Zheldakov D.Yu. The brick material durability in brickwork // AlfaBuild. 2020. No. 3 (15). P. 1504. DOI: 10.34910/ALF.15.4.EDNXSSJKS.

20. Zheldakov D.Yu., Kozlov V.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. Moisture crystallization in bricks // Nanotechnologies in Construction a Scientific Internet-Journal. 2020. Vol. 12. Issue 6. Pp. 305–312. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-305-312

21. Zheldakov D., Mustafin R., Kozlov V., Gay-sin A., Sinitsin D., Bulatov B. Durability control of brickwork's material including operation parameters of the building enclosure // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2021. Vol. 8. Issue 6. Pp. 871–880. DOI: 10.18280/mmep.080605

Поступила в редакцию 21 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Юрьевич Желдаков — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; SPIN-код: 5885-5335, Scopus: 57197842900, ResearcherID: AAX-2291-2020, ORCID: 0000-0002-4629-5583; djeld@mail.ru;

Владимир Трофимович Ерофеев — доктор технических наук, профессор, академик РААСН; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 161483; erofeevvt@bk.ru.

Вклад авторов:

Желдаков Д.Ю. — идея, разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Ерофеев В.Т. — научное руководство, научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Architectural Archive. I / ed. D. Arkina, N. Brunova, I. Matsa, D. Sukhova, O. Shchuseva.* Moscow, Publishing House of the Academy of Architecture of the USSR, 1946; 52. (rus.).
2. Smirnov V.N., Jolshin D.D. Material culture of St. Petersburg. Brick Stamps in Saint Petersburg Province in the Mid-19th – Early 20th Century. A Catalogue and Study. *Bulletin of the Institute for History of Material Culture Ras.* 2017; 214. (rus.).
3. Zheldakov D.Yu., Ponomarev O.I., Minasyan A.A., Tursukov S.A. Durability assessment of brick and stone structures in engineering surveys. *Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2023; 1(36):27-40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDN ZFIKOG. (rus.).
4. Beleyubsky N.A. *Monotonous testing of building materials: Munich, 1884. Dresden, 1887.* St. Petersburg, Printing house of the Ministry of Railways, 1888. (rus.).
5. Podvalny A.M. On the concept of ensuring frost resistance of concrete in the structures of buildings and structures. *Construction Materials.* 2004; 6:4-6. EDN IBENTJ. (rus.).
6. Shestoperov S.V. *Durability of concrete.* Moscow, Avtotransizdat Publ., 1955; 480. (rus.).
7. Belozerov G.A., Babakin B.S., Makarov B.A. Mathematical modeling of the duration of the process of freezing and melting of the eutectic solution in cold accumulators. *News of KSTU.* 2011; 23:141-147. EDN OKLUJZ. (rus.).
8. Ananyev A.I., Lobov O.I., Mozhaev V.P., Vyazovchenko P.A. The influence of various factors on the durability of structures insulated with polystyrene foam. *Housing Construction.* 2003; 3:5-9. EDN JXNUBD. (rus.).
9. Ananyev A.I. Durability and heat-protective properties of external brick walls of ancient buildings. *ABOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermophysics.* 2018; 2:52-57. EDN YRGZXB. (rus.).
10. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Lankin A.V., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. The reasons for the destruction of the face brick. *Building and Reconstruction.* 2023; 1(105):114-122. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-114-122. EDN RGJANF. (rus.).
11. Aleksandrovsky S.V. Stresses in a porous body that arise when liquid moisture freezes in its pores. *Walls and facades. Current problems of building thermal physics : collection of reports.* 2003; 9-17. (rus.).
12. Aleksandrovsky S.V. *Calculation of concrete and reinforced concrete structures for changes in temperature and humidity, taking into account creep.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1973; 432. (rus.).
13. Artamonova A.V. Binders based on slag from electric furnace production. *Construction Materials.* 2011; 5:11-13. EDN OBHCFZ. (rus.).
14. Ivanov F.M., Alekseev S.N., Gusev B.V. *Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 536. EDN UYVZTF. (rus.).
15. Castellote M., Andrade C. Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (UR-CORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in-situ. *Revista ingeniería de construcción.* 2009; 24(3). DOI: 10.4067/s0718-50732009000300003
16. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cement and Concrete Research.* 2008; 38(3):275-289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006
17. Jennings H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. *Cement and Concrete Research.* 2000; 30(1):101-116. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00209-4
18. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosyan O.P. *Thermodynamics of silicates.* Moscow, Stroyizdat, 1972; 351. (rus.).
19. Zheldakov D.Yu. The brick material durability in brickwork. *AlfaBuild.* 2020; 3(15):1504. DOI: 10.34910/ALF.15.4.EDNXSSJKS.
20. Zheldakov D.Yu., Kozlov V.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. Moisture crystallization in bricks. *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal.* 2020; 12(6):305-312. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-305-312
21. Zheldakov D., Mustafin R., Kozlov V., Gay-sin A., Sinitsin D., Bulatov B. Durability control of brickwork's material including operation parameters of the building enclosure. *Mathematical Modeling of Engineering Problems.* 2021; 8(6):871-880. DOI: 10.18280/mmep.080605

Received October 21, 2023.

Adopted in revised form on October 28, 2023.

Approved for publication on November 21, 2023.

B I O N O T E S : **Dmitriy Yu. Zheldakov** — Candidate of Technical Sciences, leading researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN);** 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 5885-5335, Scopus: 57197842900, ResearcherID: AAX-2291-2020, ORCID: 0000-0002-4629-5583; djeld@mail.ru;

Vladimir T. Erofeev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 161483; erofeevvt@bk.ru.

Contribution of the author:

Dmitriy Yu. Zheldakov — idea, development of techniques, processing of material, writing an article.

Vladimir T. Erofeev — scientific guidance, scientific editing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.